

COUPLAGE THERMO MECANIQUE

6. COUPLAGE THERMO MECANIQUE

6.1	Température dans le moule	189
6.1.1	Propriétés thermiques des matériaux.....	189
6.1.1.1	<i>Propriétés rhéologiques du bain en fonction de la température.....</i>	189
6.1.1.2	<i>Propriétés thermiques du moule</i>	190
6.1.1.2.1	Propriétés du moule industriel	190
6.1.1.2.2	Propriétés du moule employé pour la simulation numérique	190
6.1.2	Détermination théorique de la température à la surface du moule.....	191
6.1.3	Détermination expérimentale de la variation de température en surface du moule.....	192
6.1.4	Modélisation de la variation de température dans le moule.....	193
6.2	Influence de la température lors du trempage	196
6.2.1	Comparaison entre l'épaisseur déposée mesurée et prédite numériquement.	196
6.2.2	Importance de la variation de la température dans le moule.....	196
6.2.3	Influence de la température sur l'épaisseur mesurée.....	198
6.2.3.1	<i>Température du bain</i>	198
6.2.3.2	<i>Température du moule</i>	201

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier l'influence des différences de température entre les différents milieux lors du trempage dans le cas du procédé utilisant le PVA : le moule est chauffé initialement à 80°C puis il est plongé dans un bain de PVA maintenu à 30°C. Nous présentons dans ce chapitre le cas de ce trempage sur un moule cylindrique.

Le premier paragraphe est consacré à la mise en place des données thermiques pour permettre une modélisation correcte. Nous y aborderons également l'étude des variations de température en surface et au sein du moule au cours du trempage. La deuxième partie est consacrée à la détermination de l'influence de la température du bain et du moule sur la forme de l'épaisseur extraite. Nous nous attacherons à vérifier si l'hypothèse d'une température du moule constante au cours du temps rapportée dans la littérature est applicable dans notre cas.

6.1 Température dans le moule

Dans le cadre du trempage des gants, le moule est chauffé à plus haute température que le bain. Ce paragraphe est centré sur l'étude de l'évolution de la température dans les différents milieux au cours du temps.

6.1.1 Propriétés thermiques des matériaux

6.1.1.1 *Propriétés rhéologiques du bain en fonction de la température*

Le bain est maintenu à une température de 30°C, mais au cours du trempage, lorsque le moule chaud entre en contact avec ce dernier, sa température change au niveau de l'interface avec l'outil. Cela n'a pas pour conséquence de provoquer un changement de phase (pas de solidification ni de gélification) mais il y a une modification locale de la viscosité du fluide. Nous avons vu précédemment que le caractère rhéologique du fluide est un des facteurs ayant une grande influence sur la forme de la surface libre : plus la viscosité est faible, plus l'épaisseur est petite.

La variation de viscosité en fonction de la température est modélisée à partir de la loi d'Arrhénius :

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R_g} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad \text{Eq. 6-1}$$

où, pour le cas du PVA, T est la température du fluide, T_{ref} la température de référence valant dans ce cas 27°C, μ_0 la viscosité à la température de référence T_{ref} équivalente à

$\mu_0 = 0,44 \text{ Pa.s}$, R_g la constante des gaz parfaits et E_a l'énergie d'activation telle que $E_a = 20,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Numériquement, la loi d'Arrhénius se combine à la loi visco-plastique de type Norton-Hoff grâce à l'expression suivante :

$$K(T, \bar{\varepsilon}) = K_0 (\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^i e^{-\beta T} \quad \text{Eq. 6-2}$$

avec $K_0 = 0,80 \text{ Pa.s}$ et $\beta = 0,023$ pour le PVA. Sa conductivité thermique est de $\lambda^c = 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

6.1.1.2 Propriétés thermiques du moule

6.1.1.2.1 Propriétés du moule industriel

Le moule employé industriellement pour le trempage dans le PVA est en céramique recouvert d'une couche flocage + néoprène : il s'agit donc d'un ensemble multicouche. Ses propriétés thermique et géométrique sont données *Figure 6-1*. Le moule est creux mais la partie céramique a une épaisseur nettement plus grande que celles du flocage et du néoprène réunis.

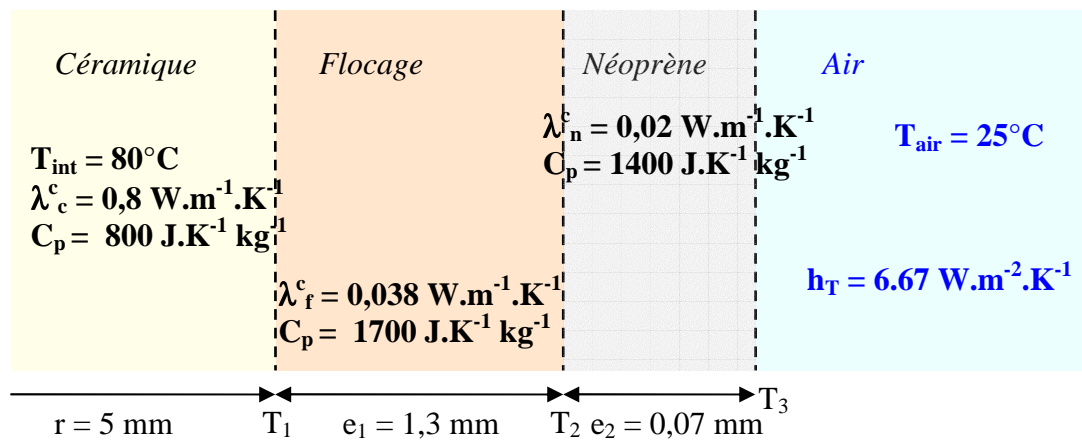


Figure 6-1 : Propriétés géométrique et thermique de l'ensemble multicouche du moule employé pour le PVA

6.1.1.2.2 Propriétés du moule employé pour la simulation numérique

Pour simplifier la modélisation et la simulation numérique, nous considérerons un moule plein de rayon $R_m = 12,5 \text{ mm}$ et constitué d'un même matériau (*Figure 6-2*). L'utilisation d'un système multicouche aurait été compliqué à mettre en œuvre numériquement et nous avons choisi un système équivalent au moule industriel mais constitué que d'une seule couche. La

détermination des propriétés thermiques du moule permettant d'obtenir les mêmes propriétés que celles décrites *Figure 6-1* est donnée dans le paragraphe suivant.

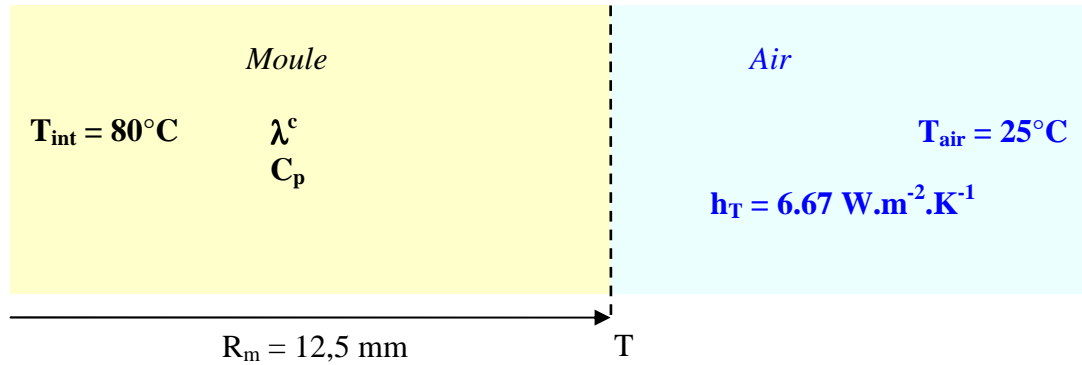


Figure 6-2 : Schéma du moule employé pour la simulation numérique

6.1.2 Détermination théorique de la température à la surface du moule

Entre le moment de la sortie du moule hors du four et son immersion dans le bain, il s'écoule environ 60s sur notre cas expérimental. Il est possible de déterminer l'ensemble des températures T_1 , T_2 et T_3 de la *Figure 6-1* à partir des conditions thermiques entre les milieux durant cette étape. Pour cela, il faut résoudre le système suivant :

$$\frac{\lambda^c}{r}(T_{\text{int}} - T_1) = \frac{\lambda^c}{e_1}(T_1 - T_2) = \frac{\lambda^c}{e_2}(T_2 - T_3) = h_T(T_3 - T_{\text{air}}) \quad \text{Eq. 6-3}$$

La résolution de ce système à l'aide des valeurs de la *Figure 6-1* donne les valeurs des températures suivantes :

$$\begin{cases} T_1 = 65,6^\circ\text{C} \\ T_2 = 60,2^\circ\text{C} \\ T_3 = 59,6^\circ\text{C} \end{cases}$$

La température à l'interface air / moule vaut donc $59,6^\circ\text{C}$.

Dans le cas d'un moule plein constitué d'un même matériau, le système permettant de calculer la température T_i à l'interface moule / air est le suivant :

$$\frac{\lambda^c}{R_m}(T_{\text{int}} - T_i) = h_T(T_i - T_{\text{air}}) \quad \text{Eq. 6-4}$$

Il est possible à partir de l'équation 6-4 de déterminer les propriétés thermiques du moule employé numériquement à partir des résultats trouvés à l'aide de l'équation 6-3. La conductivité thermique permettant d'obtenir une température d'interface de 59,6°C en considérant la température interne de 80°C et externe de 25°C est équivalente à $\lambda^c = 0,08 W.m^{-1}.K^{-1}$. Cette approximation peut paraître grossière mais dans la suite de ce paragraphe, nous montrerons qu'elle donne des résultats très cohérents avec les observations expérimentales.

Une fois le moule plongé dans le bain, il entre en contact avec le PVA qui est maintenu à une température de 30°C à l'aide d'une plaque chauffante. L'outil simulé a alors sa température en surface qui varie selon l'équation suivante :

$$\frac{\lambda^c}{R_m}(T_{int} - T_i) = \frac{\lambda_{PVA}^c}{R_{bain}}(T_i - T_{PVA}) \quad \text{Eq. 6-5}$$

avec le rayon du bain $R_{bain} = 40mm$ (taille du matériel employé expérimentalement), T_{int} la température du moule équivalente à 59,6°C et T_{PVA} la température du bain de PVA valant 30°C. Selon ce calcul, la température à l'interface T_i est alors de 39,9°C.

6.1.3 Détermination expérimentale de la variation de température en surface du moule

Pour contrôler et mesurer les variations de températures aux interfaces moule / air puis moule / PVA au cours du trempage, nous avons collé une sonde thermique à la surface du moule (système multicouches) lors d'une opération réelle de trempage. La première étape consiste à le chauffer dans une étuve à 80°C pendant 1 heure ; l'objectif est d'obtenir une température uniforme de l'outil en sortie du four. Il est ensuite plongé dans un bain de PVA maintenu à 30°C grâce à une plaque chauffante. Le temps de contact entre le moule et l'air avant immersion est de 60s : il correspond au temps de transfert entre le four et l'appareil de trempage et celui pour le descendre dans le bain à une vitesse de 10 mm/s.

La Figure 6-3 donne l'évolution de la température à la surface du moule que nous avons mesurée. Pendant les 60s de contact entre le moule et l'air, la température en surface de l'outil passe de 80°C à 61°C. Cette diminution ne se fait pas linéairement du fait de la diffusivité thermique : elle se fait principalement durant les premières secondes. Nous retrouvons ici approximativement la valeur obtenue à l'aide du calcul de l'équation 6-3. Ensuite, une fois le moule plongé dans le bain, sa température en surface se stabilise à une température de 39°C très rapidement. Encore une fois, la valeur trouvée expérimentalement se rapproche de celle trouvée à l'aide des calculs théoriques de 39,9°C.

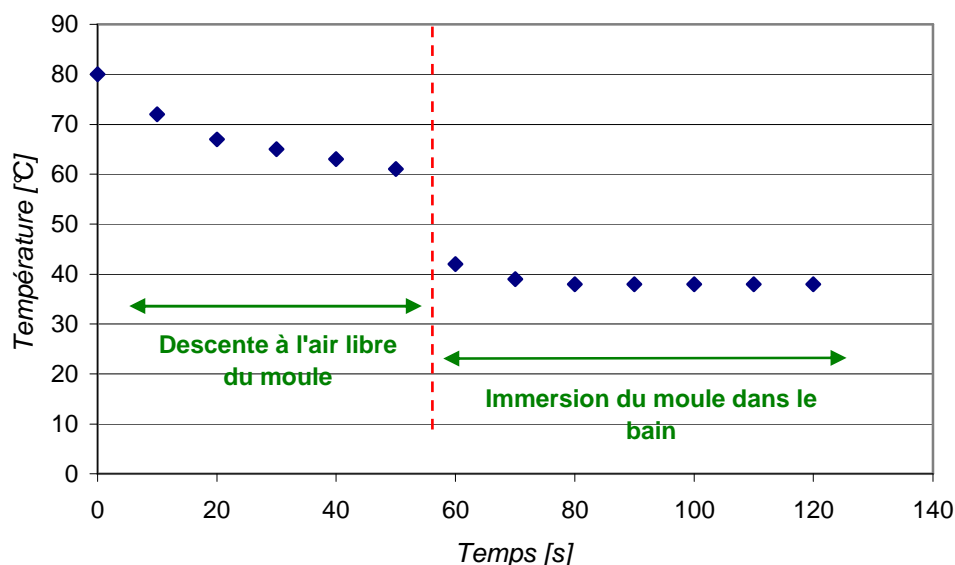


Figure 6-3 : Evolution de la température du moule en surface au cours du trempage

6.1.4 Modélisation de la variation de température dans le moule

La modélisation de la variation de température dans le moule se fait sous Forge3 en le considérant comme un outil déformable maillé en volume et non plus en surface comme jusqu'à présent. L'expérience faite précédemment a été modélisée, c'est-à-dire le moule chauffé préalablement à une température uniforme de 80°C est, pendant 60 s, exposé au milieu ambiant à 25°C (air) puis plongé à une vitesse de 10 mm/s dans le bain de PVA maintenu à 30°C.

La *Figure 6-4* donne l'évolution de la température dans le moule après qu'il ait été maintenu 60s dans l'air. La température à l'interface moule / air est à cet instant de 61,5°C, valeur très proche de celle obtenue expérimentalement et celle calculée à l'aide des équations théoriques. La variation de température dans le moule évolue de 61,5°C en surface à 80°C au cœur comme le montre le graphique de la *Figure 6-4*. Cette variation n'est pas linéaire, la température chutant brutalement sur environ 5 mm de profondeur à partir de la surface pour ensuite se rapprocher de 80°C.

La *Figure 6-5* donne l'évolution de la température dans le moule au contact du bain de PVA. La température à l'interface moule / liquide après émergence complète est de 40°C à une hauteur de 10mm au dessus du point le plus bas dans le moule et de 49 °C pour une hauteur de 35mm (hauteur de trempage du moule dans le bain). Expérimentalement, nous avons trouvé 39°C, la sonde ayant été placée juste au dessus de la partie sphérique : nous retrouvons donc bien les mêmes ordres de grandeur. L'avantage de la simulation numérique est bien

démontrée ici : elle permet de mettre en évidence les différences de température le long du moule, les parties basses étant plus longtemps plongée dans le bain que les parties hautes. La variation de température dans le moule varie moins brutalement que pour le cas de la *Figure 6-4* : à mesure que l'on approche du centre du moule, la température augmente jusqu'à atteindre 80°C comme le montre le graphique de la *Figure 6-5*.

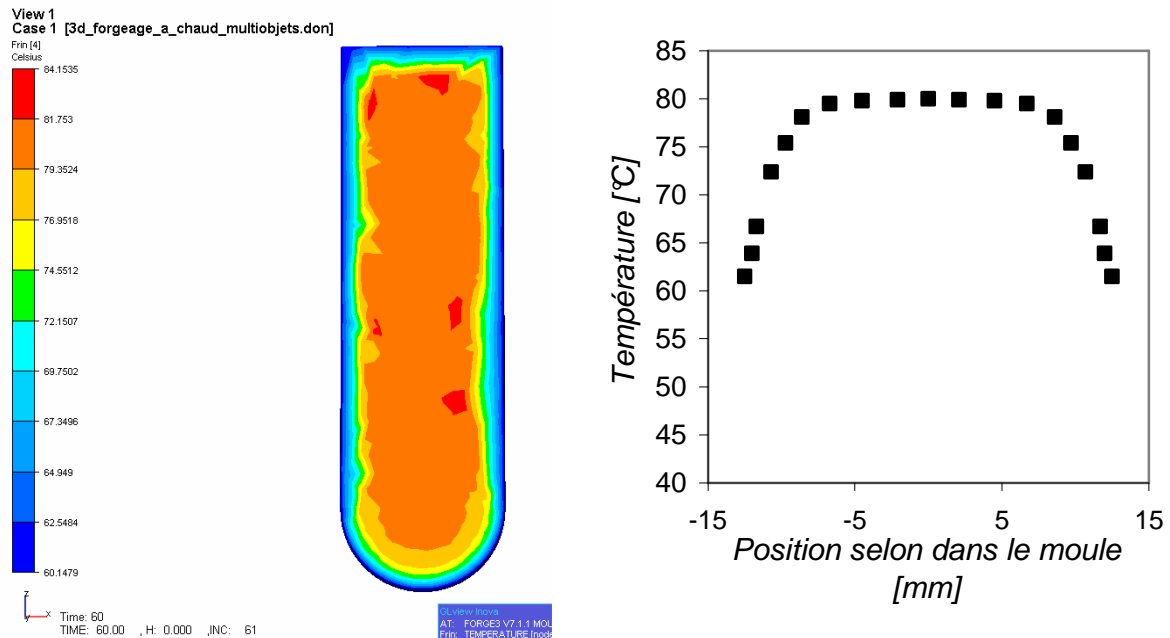


Figure 6-4 : Température dans le moule après 60s dans l'air à 25°C

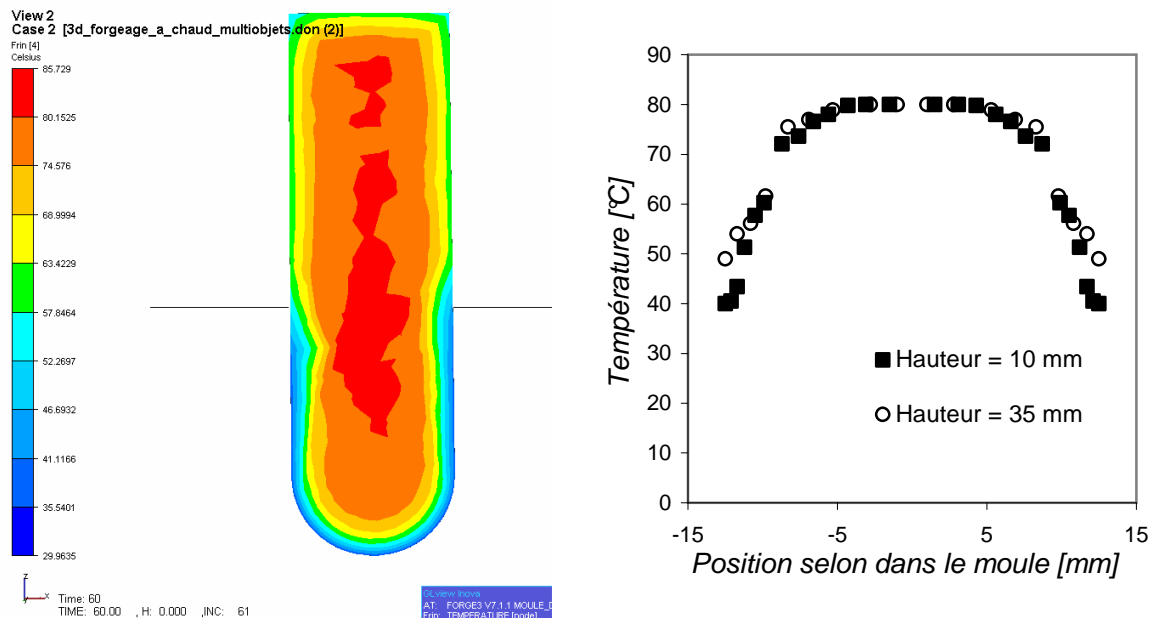


Figure 6-5 : Température dans le moule lors de son contact avec le bain de PVA à 30°C

Dans l'air comme dans le PVA, les variations de températures de l'interface trouvées numériquement correspondent bien à celles observées expérimentalement. Le cœur du moule conserve sa température initiale de 80°C même une fois plongé dans le bain. A noter ici que dans la réalité, le moule étant creux, la température de l'air à l'intérieur est aussi fonction de l'autorayonnement des parois internes du moule, ce qui n'a pas été intégré ici.

6.2 Influence de la température lors du trempage

Dans ce paragraphe nous nous proposons d'étudier l'influence de la température sur la forme de la surface libre au cours du trempage dans un bain de PVA. En plus de la comparaison entre trempage numérique et expérimental, nous allons voir l'importance de la prise en compte de la thermique dans l'outil et l'influence de la variation de température des différents milieux sur l'épaisseur.

6.2.1 Comparaison entre l'épaisseur déposée mesurée et prédite numériquement

L'épaisseur de la couche déposée mesurée expérimentalement donne des valeurs approchées de celles trouvées numériquement (*Figure 6-6*) pour un moule chauffé à 80°C et un bain maintenu à 30°C. Les principales sources de différences sont liées aux erreurs des mesures expérimentales. En plus de celles liées à la délimitation de la surface libre sur les photographies viennent s'ajouter celles dues aux températures plus ou moins bien maîtrisées. Il est difficile expérimentalement de contrôler au degré près les températures du moule, du bain et du milieu ambiant. Ceci explique les différences entre mesure et simulation observées sur la *Figure 6-6*.

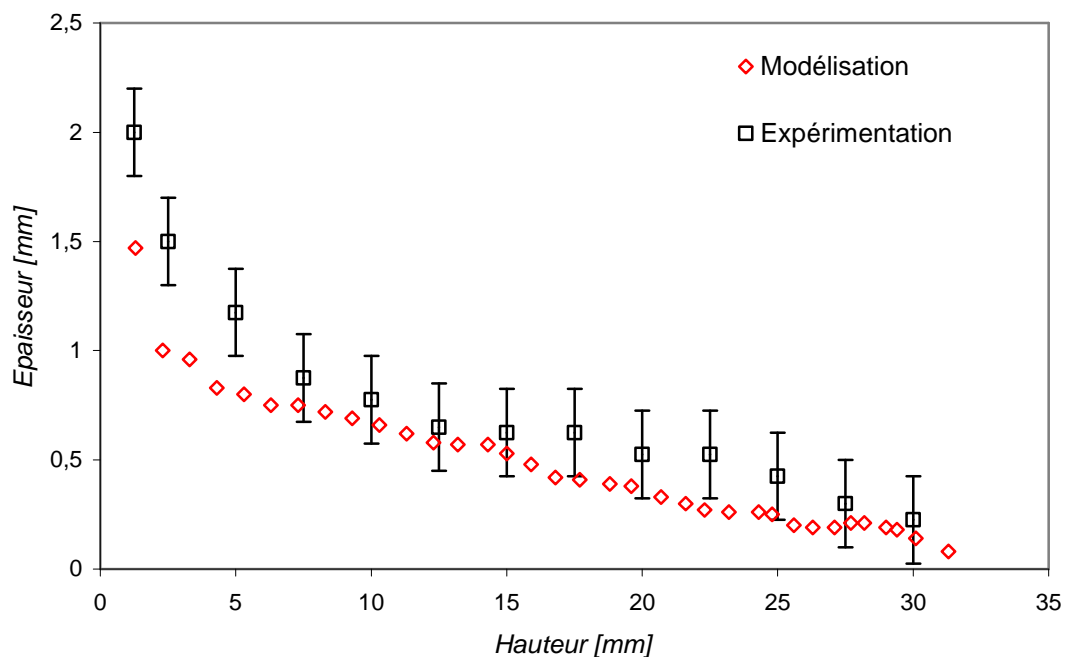


Figure 6-6 : Comparaison entre modélisation numérique et expérience de trempage à chaud. Epaisseur de la couche déposée en fonction de la position sur le moule.

6.2.2 Importance de la variation de la température dans le moule

Dans la littérature, certains modèles permettant la prédiction de l'épaisseur ([Bikard07], [Cheung85] et [Seeniraj81]) considèrent la température du moule comme constante au cours

du temps lors de trempage à chaud. Il apparaît donc intéressant de voir si une telle hypothèse est valide dans notre cas.

La Figure 6-7 montre la comparaison entre les épaisseurs pour trois cas de trempage différents dans un bain de PVA maintenu à 30°C. Le premier essai a consisté à plonger un moule préalablement chauffé à 80°C et dont la température varie avec le temps et le milieu ambiant (propriétés thermiques de l'outil données dans le paragraphe 6.1.1.2). Les deux autres cas correspondent au trempage d'un moule à température constante. Le premier est maintenu à une température de 39°C car nous avons montré expérimentalement et numériquement que la surface du moule une fois plongée dans le bain se stabilisait rapidement à cette température. Le deuxième est à une température constante de 80°C qui est la température initiale à laquelle est chauffé le moule.

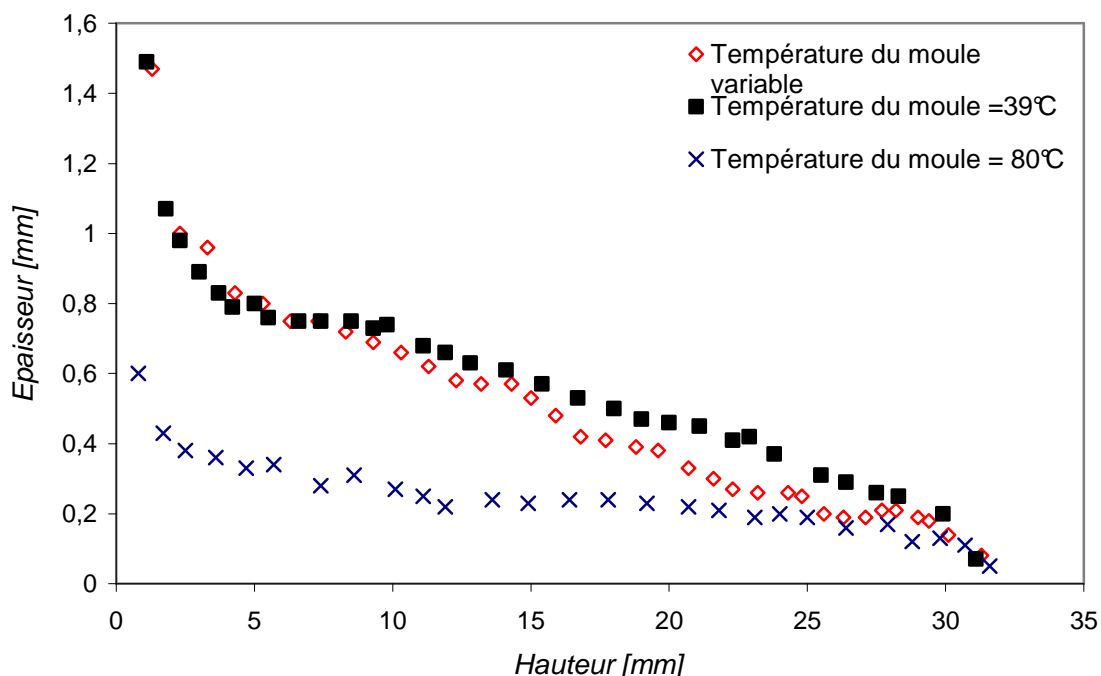


Figure 6-7 : Influence de la thermique dans l'outil sur l'épaisseur

Lorsque le moule est maintenu à une température de 80°C, l'épaisseur extraite est nettement plus petite que dans le cas où la thermique dans l'outil est prise en compte. Considérer la température du moule comme constante et égale à la température initiale du moule au cours du temps est donc une hypothèse non applicable dans le cadre du trempage dans le PVA. En effet, la surface du moule passe de 80°C à 39°C après immersion dans le bain ce qui conduit à une variation de viscosité de 0,14 Pa.s à 80°C à 0,31 Pa.s à 39°C.

Par contre, les différences entre les épaisseurs des cas avec thermique dans l'outil et avec maintien de la température en surface à 39°C montre des résultats très proches. Les

principales différences se situent dans la partie supérieure du moule (entre 15 et 30 mm de hauteur) : l'épaisseur est légèrement plus faible pour le cas où le moule a sa température variable. En fait, dans ce cas, les zones supérieures ont été en contact moins longtemps avec le bain : la

Figure 6-5 montre bien qu'à une hauteur de 35 mm, la température en surface est de 49°C et non pas 39°C dans les zones plus proches de l'hémisphère. En effet, cette zone est immergée plus tardivement et remontée plus tôt. Le fluide y acquiert donc une température plus élevée que dans le reste de l'épaisseur et il a donc une plus faible viscosité. C'est pourquoi l'épaisseur y est plus petite que si le moule était maintenu à 39°C. Dans ce second cas, la viscosité est uniforme le long du moule et correspond à celle obtenue à 39°C.

6.2.3 Influence de la température sur l'épaisseur mesurée

La température a une influence sur l'épaisseur extraite au cours du trempage à cause de son influence sur la viscosité. Nous allons voir au travers de cette partie l'influence de cette dernière sur les épaisseurs en faisant varier les températures du bain et du moule.

6.2.3.1 *Température du bain*

– Cas d'un moule à température constante

Lorsqu'un moule avec une température constante en surface (ici 39°C) est plongé dans un bain de PVA, rapidement autour de ce dernier se forme une fine épaisseur de fluide adoptant cette température. C'est ce que montre la *Figure 6-8* : la température du bain est équivalente à celle en surface du moule autour de ce dernier. Loin du moule, la température du bain est celle imposée par la plaque chauffante. L'apparition du film autour du moule à température de l'outil se produit quelque soit la température initiale du bain, qu'elle lui soit supérieure ou inférieure.

Dans le cas d'un moule avec une température en surface constante, l'épaisseur extraite ne varie donc pas lorsque la température du bain change (*Figure 6-9*). En fait, comme l'épaisseur adopte la température du moule et non plus celle du bain, la viscosité y est localement la même comme dans les deux exemples donnés dans les *Figure 6-8* et *Figure 6-9*. C'est pourquoi aucune différence d'épaisseur n'est observée.

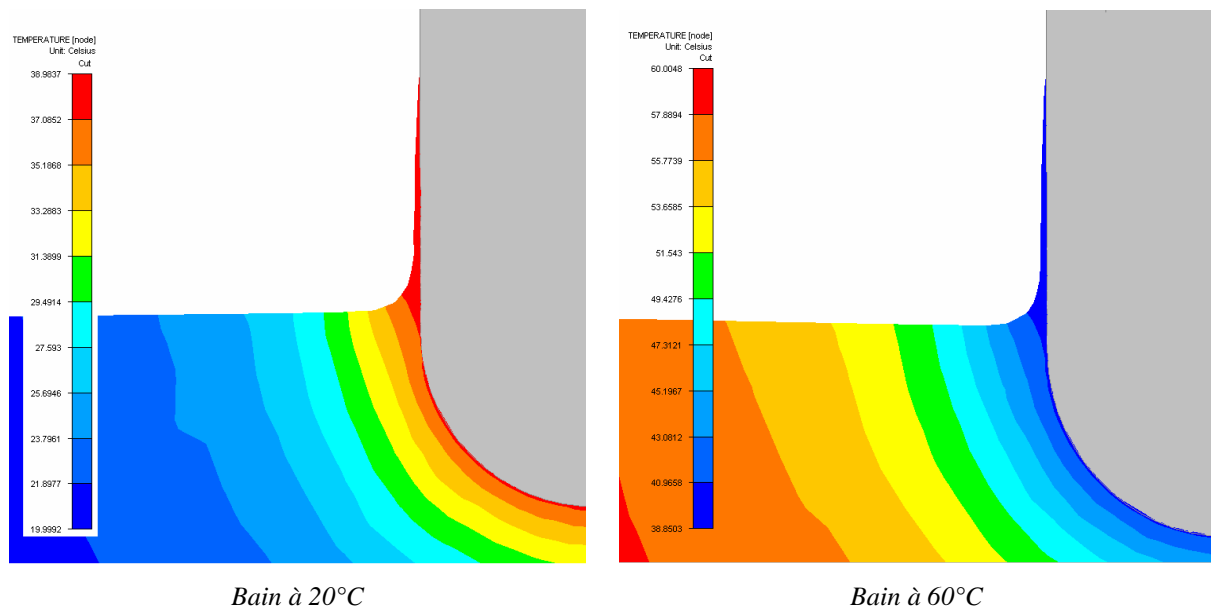


Figure 6-8 : Variation de température dans le bain

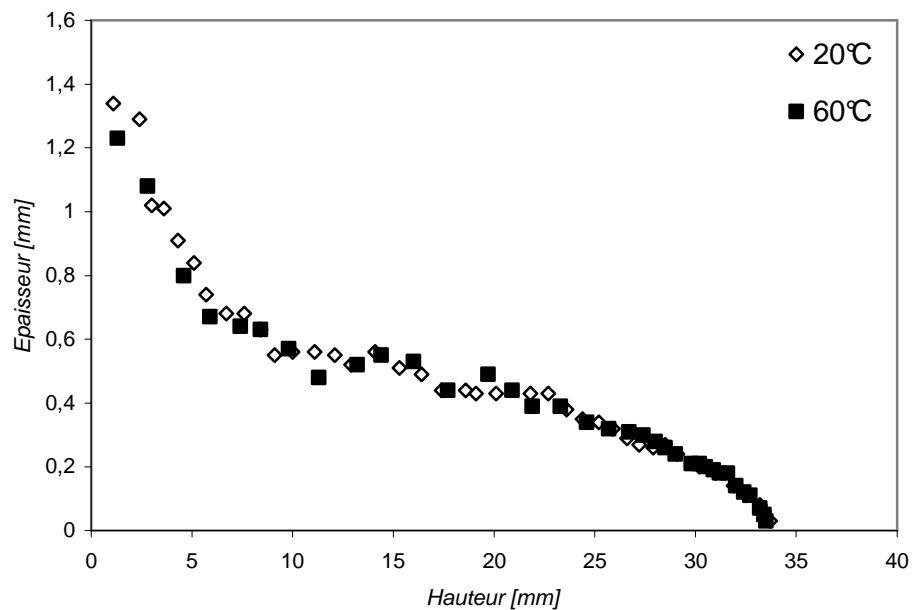


Figure 6-9 : Influence de la température du bain sur l'épaisseur extraite pour un moule maintenu à 39°C

- Cas d'un moule à température variable

Dans le cas où la température du moule est considérée comme variable, la température du bain joue un rôle important puisque c'est au travers des échanges thermiques entre les deux milieux que la température au niveau de l'épaisseur est déterminée.

La température du moule en surface est dépendante de sa température initiale et de la température du bain (Figure 6-10). Elle augmente linéairement en fonction de ces deux températures. Une fois établie, la température en surface du support va influencer localement celle du bain et ainsi déterminer la viscosité du fluide.

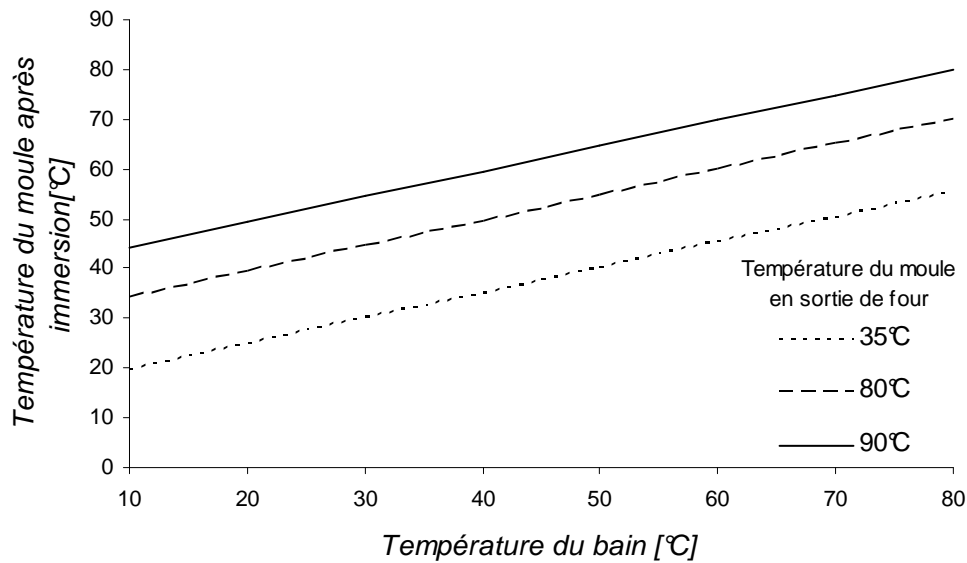


Figure 6-10 : Variation de la température en surface du moule en fonction de la température du bain de PVA et de la température initiale

Logiquement, plus la température de maintien du fluide est grande, plus l'épaisseur est faible (*Figure 6-11*). Dans le cas d'un bain chauffé à 80°C, la température dans l'épaisseur est de 70°C : le PVA y a une viscosité de 0,16 Pa.s. Dans le deuxième cas où le bain est à 30°C, le fluide autour du moule est à 39°C d'où une viscosité de l'ordre de 0,31 Pa.s. On retrouve bien ici l'importance des températures de chauffe des deux milieux qui conduisent à la viscosité du bain, qui est un des facteurs déterminant l'épaisseur.

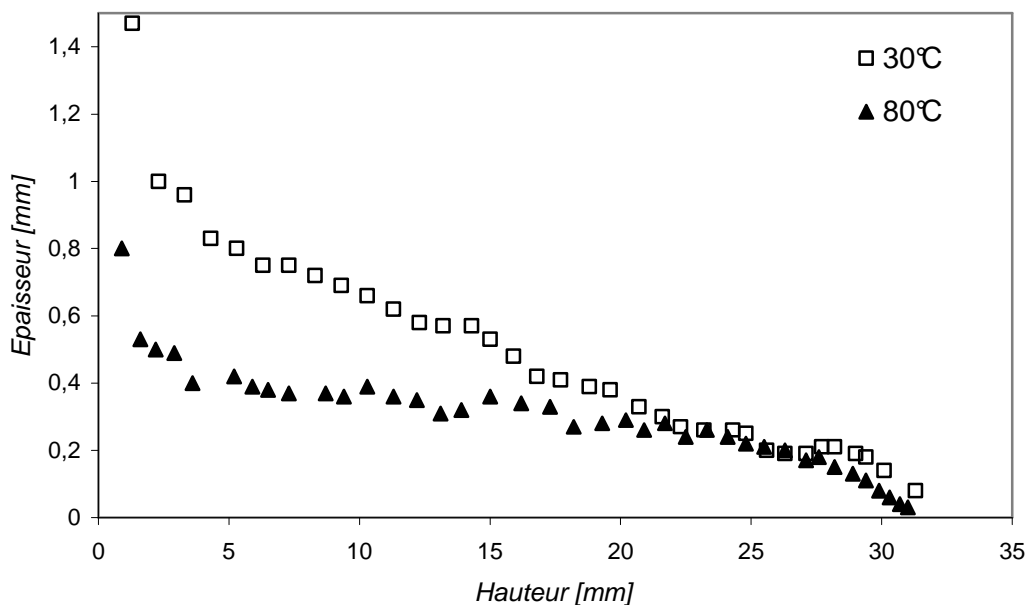


Figure 6-11 : Influence de la température du bain sur l'épaisseur du bain lorsque le moule est de température variable

6.2.3.2 Température du moule

Comme nous venons de la voir, la température du moule est le facteur déterminant de l'épaisseur puisque localement autour de ce dernier, le PVA adopte une température comprise entre celle du bain et celle du moule. La *Figure 6-12* expose le cas d'un moule à température constante plongé dans un bain à 30°C. Logiquement, plus sa température est grande, plus l'épaisseur est faible puisque plus la viscosité du PVA y est petite. Le réglage de la température du moule est donc un moyen de réguler la viscosité du bain d'un même fluide sans modifier sa composition et ainsi obtenir les épaisseurs désirées.

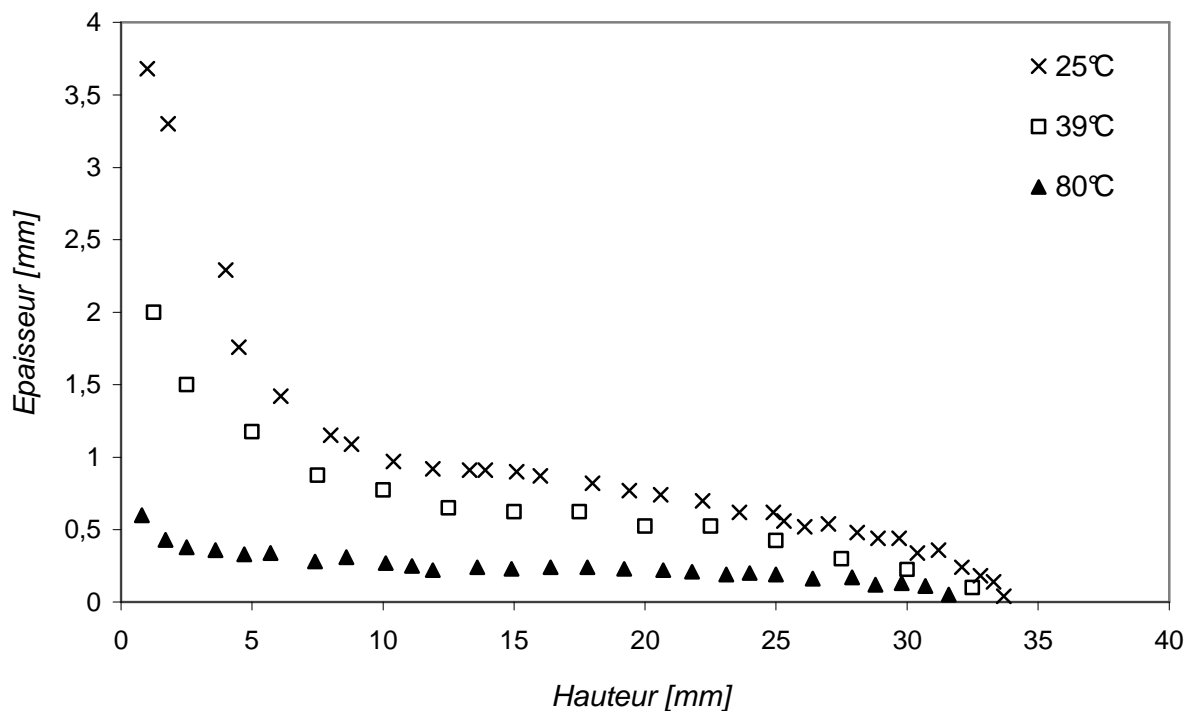


Figure 6-12 : Variation de l'épaisseur en fonction de la température du moule

Ce chapitre a donné les résultats de l'étude du trempage à chaud. Il a permis de mettre en place la modélisation numérique et de constater que dans le cadre de la mise en forme des gants, le facteur thermique joue un rôle important puisqu'il permet d'ajuster la viscosité du bain en fonction des besoins au niveau des épaisseurs : plus le moule sera chaud, plus l'épaisseur sera petite. Nous avons également démontré que pour ce type de trempage, l'hypothèse d'une température du moule constante au cours du temps était grossière et qu'il fallait donc tenir compte des variations de température du moule. Cependant, une fois plongé dans le bain, l'outil se stabilise thermiquement en surface.
